

# 建筑布局对空间舒适性影响的数值模拟

李光耀, 秦 洁

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 采用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型对某培训中心建筑群的环境风场和压力场进行数值模拟。结果表明, 考虑了季节主导风向的半围合式布局设计, 有效地保证了夏季通风和冬季保暖, 有利于学员户外运动; 建筑物迎、背风面压差随高度变化呈现明显的差异, 一些楼层的角隅处需要辅助通风手段改善室内空气品质。结合风速、风压、空气龄等指标分析建筑环境的舒适性, 对建筑风环境的改善及建筑节能有一定的参考意义。

**关键词:** 半围合布局; 自然通风; 风环境; 舒适性

**中图分类号:** TU312.1

**文献标志码:** A

## Numerical Simulation of Impact of Building Layout on Spatial Comfort

LI Guangyao, QIN Jie

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The airflow and pressure around buildings of a typical training center were simulated using RNG  $k-\epsilon$  turbulence models. The results show that considering the prevailing wind direction in different seasons, the semi-closed layout is good for ventilation in summer and keeping warm in winter, which benefits outdoor activities. The pressure differences between windward facade and leeward facade fluctuates significantly with the change of height, so the corners of certain floors need auxiliary means to improve the room ventilation. Based on the analysis of wind velocity, pressure and air age around the buildings, some suggestions are offered to the improvement of resident comfort and building energy conservation.

**Key words:** semi-closed layout; natural ventilation; wind environment; comfort

们的重视, 生态城市、绿色建筑的理念不断被提出<sup>[1-2]</sup>。建筑物作为城市的重要组成部分, 其造型、尺度和规划布局情况会对周围的风速、温度、湿度等微气候产生重要影响<sup>[3-4]</sup>。合理的建筑布局设计可以改善周边区域的风热环境, 有效提高建筑物内外的舒适性和空气品质, 加快污染物扩散, 降低供暖制冷能耗, 节约能源。

计算流体力学(CFD)是利用电子计算机和离散化的数值方法对流体力学问题进行数值模拟和分析的一个新分支。相比于实地观测和风洞试验, 数值模拟的方法成本低廉, 研究周期短, 能够比较准确地模拟复杂的计算过程, 近些年来, 在建筑周边环境模拟、建筑形态的空气动力学评估和小区布局规划评价等方面得到了一定的应用<sup>[5-8]</sup>。

## 1 数值模拟理论

流体流动和传热必须服从质量守恒定律、动量守恒定律及能量守恒定律。建筑物对近地面的空气流动造成了阻碍, 按湍流作用下的钝体空气动力学理论, 建筑周围的流动风可以看作大气边界层中的低速不可压缩湍流过程<sup>[9]</sup>, 因此还需要遵守附加的湍流输运方程<sup>[10]</sup>。

常用的湍流模型有 Spalart-Allmaras 模型、雷诺压力模型(RSM)、 $k-\epsilon$ 模型等。Spalart-Allmaras 模型是一个低雷诺数的单方程模型, 较为简单经济, 但对长度尺寸变化的适应性不好。RSM 模型由于严格地考虑了流线型弯曲、漩涡、旋转和张力的快速变化, 可以进行复杂流动的高精度计算, 但比单方程和双方程模型会耗费更多的 CPU 资源。Launder 和 Spalding 提出的标准  $k-\epsilon$  模型是工程流场计算中的主要工具, 它是一个双方程模型, 假设流动为完全湍流, 忽略分子黏性的影响。由于其在数值计算中波动

随着生活水平的提高, 居住环境越来越受到人

收稿日期: 2015-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(51378365); 上海市科学技术委员会资助项目(11230705500)

第一作者: 李光耀(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为虚拟现实与城市仿真。E-mail: lgy@tongji.edu.cn

通讯作者: 秦 洁(1990—), 女, 硕士生, 主要研究方向为虚拟现实与城市仿真。E-mail: zqinjie@outlook.com

小、精度高、计算量合适,故具有较为广泛的应用<sup>[11]</sup>. RNG  $k$ - $\epsilon$  模型<sup>[12]</sup> 来源于严格的统计技术,与标准  $k$ - $\epsilon$  模型相似,但考虑到了湍流涡旋,并为湍流 Prandtl 数提供了一个解析公式,因此具有更高的可信度和精度. 本文采用 RNG  $k$ - $\epsilon$  湍流模型进行模拟,其湍流控制方程如式(1)~(4)所示,其中式(1)为连续性方程,式(2)为动量方程,式(3)为  $k$  方程,式(4)为  $\epsilon$  方程.

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\gamma + \gamma_t) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \gamma_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\gamma + \frac{\gamma_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \gamma_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (3)$$

$$U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\gamma + \frac{\gamma_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} \gamma_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} + R \quad (4)$$

式(1)~(4)中: $U_i$  ( $i=1,2,3$ ) 分别为沿坐标轴  $x, y, z$  方向的平均速度分量; $\rho$  为空气密度; $p$  为平均压力; $\gamma$  为气流运动黏度; $\gamma_t$  为涡团运动黏度; $k, \epsilon$  分别为湍流动能和湍流耗散率; $\sigma_k=0.72$ ;  $\sigma_\epsilon=0.72$ ;  $C_1=1.42$ ;  $C_2=1.68$ ;  $R=-C_\mu \eta^3 (1-\eta/\eta_0) \epsilon^4 / (1+\beta \eta^3) k$ ,  $C_\mu=0.085$ ,  $\eta=Sk/\epsilon$ ,  $S=(2S_{ij}S_{ij})^{\frac{1}{2}}$ ,  $S_{ij}$  为平均应变张量分量,  $\eta_0=4.38$ ,  $\beta=0.015$ .

在计算空气龄时,需要联立求解连续性方程(式(1))和平均空气龄方程<sup>[13]</sup>(式(5)).

$$\frac{\partial \rho \tau}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j \tau}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{\tau, \text{eff}} \frac{\partial \tau}{\partial x_j} \right) + \rho \quad (5)$$

式中: $\Gamma_{\tau, \text{eff}} = \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\tau}$  为有效紊流扩散系数,  $\mu_{\text{eff}}$  为计算空气龄时的有效黏度;  $\sigma_\tau=1.0$ .

在建筑物的影响下,空气的湍流流动可划分为核心区 and 近壁区. 核心区的流动受建筑壁面影响小,可视为完全发展湍流;近壁面区因受到壁面切应力和摩擦力等流动条件的影响,湍流变化剧烈,可再分为黏性底层、过渡层和对数律层.  $k$ - $\epsilon$  模型和 RSM 模型都是高雷诺数模型,只适用于核心区的风环境模拟;壁面函数法和低雷诺数  $k$ - $\epsilon$  模型法可以用于改进近壁区的风环境模拟.

## 2 数值模拟应用

### 2.1 建筑模型的建立及网格划分

选取河南省公安厅警官培训中心的教学区建筑群为分析对象,其平面设计方案如图 1 所示,礼堂、宿舍楼、食堂等建筑呈半围合式组团布局. 该建筑群建设用地东西长约 200 m,南北宽约 160 m,为低层建筑群. 本文按照 1:1 的比例对培训中心建筑建立简化模型(图 2),其中礼堂(西北角)高度为 14.0~21.0 m 不等,宿舍楼(北侧)高约 14.5 m,食堂(东侧)高 11.0~13.0 m 不等,保留建筑和配套建筑高度分别为 14.5 m 和 5.0 m.

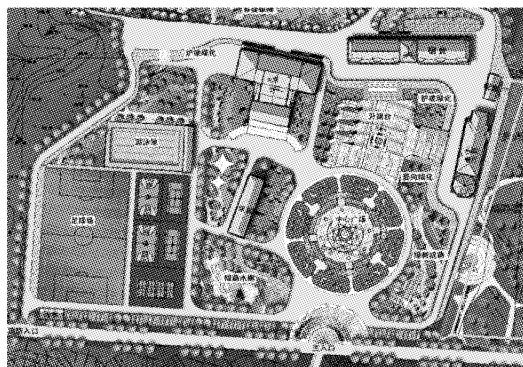


图 1 培训中心教学区建筑平面图

Fig.1 Floor plan of training center

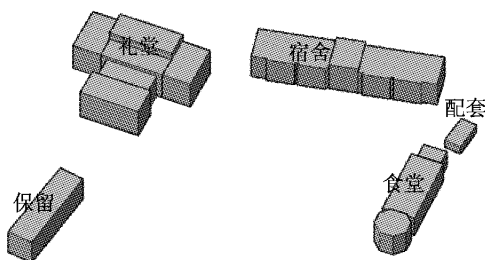


图 2 建筑群简化模型

Fig.2 Simplified model of buildings

建立了简化的建筑群模型之后,需要确定有效的计算区域. 计算域过小会产生偏差,降低计算的准确性;计算域过大则会增加计算复杂度,浪费时间和资源,因而需要设定一个合理的计算范围. 原则上,在数值模拟中,当外部绕场流中模型的阻塞率小于 3% 时,计算域的尺度取值较为合理<sup>[14]</sup>. 经过反复研究和计算,本文选取的计算区域大小为 450.0 m × 350.0 m × 70.0 m,建筑群处于计算区域底部的中心位置.

网格的质量对计算的精度和准确性有着重要的

影响. 本文采用非结构化网格对流场计算区域进行划分, 非结构化网格没有规则的拓扑结构, 因而具有较高的灵活性, 可以简化几何结构复杂的下垫面的网格划分<sup>[15]</sup>. 这样确定划分为 743 215 个网格单元, 建筑表面和地面网格划分见图 3.

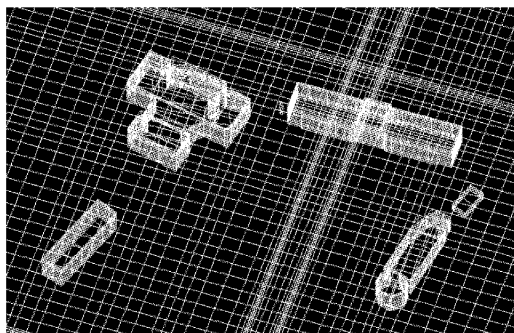


图3 划分非结构化网格

Fig.3 Unstructured grids for simulation

## 2.2 区域环境

案例地处河南省济源市西南小浪底水利枢纽工程附近, 位于黄河流域中段, 属亚热带向暖温带过渡地带, 季风环流明显, 光照充足, 年日照时间在 2 200 h 左右, 为大陆性气候. 全年气候特点是: 四季分明, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥, 春秋季节气候温和且持续时间短暂. 从风向看, 冬季盛行东北风, 夏季盛行偏南风. 年平均气温为 14~15℃, 年平均降雨量为 600~700 mm, 降水主要集中在夏秋两季.

本次实验使用 CFD 软件对夏季和冬季两种工况进行模拟, 如表 1 所示.

表1 案例地区气候条件  
Tab.1 Climate conditions

季节	温度/ K	相对湿度/ %	大气压 强/kPa	平均风 速/(m·s <sup>-1</sup> )	风向
夏季	300	72	99.5	2.8	南风
冬季	274	59	102.7	3.5	东北风

## 2.3 边界条件设定

合理的边界条件有利于模拟真实的建筑环境. 分析案例所处的地理位置及其气候条件, 判断其不同季节的主导风向、风速、温度及气压, 从而确立模拟区域的输入输出条件, 以此代替完全开口的流场.

(1) 入口边界条件: 本例在计算区域的入口采用速度进口边界条件(velocity-inlet), 分别以当地夏季主导风南风 and 冬季主导风东北风作为入口风向进行计算.

当近地面的气流在穿过不同的下垫面(如海洋、平原、山地、森林、城市等)时, 会受到摩擦力的作用导致速度下降, 其湍流度、旋涡尺度等也会产生变

化<sup>[16]</sup>. 这种变化随着海拔的增高而减小, 直至达到一定高度时(一般为距地面几百米到 1 000 m 不等), 才可忽略地面粗糙度的影响. 为使模拟与真实条件相符, 需要考虑在下垫面的作用下风速随高度的变化情况. 针对本文所研究的内容, 采用指数率表示近地面层的入口风速<sup>[17]</sup>, 入口边界条件如下:

$$u(z) = u_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (6)$$

$$I(z) = 0.1 \left( \frac{z_g}{z} \right)^\alpha \quad (7)$$

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2 \quad (8)$$

$$\epsilon = C_\mu^{3/4} \left( \frac{K^{3/2}}{l} \right) \quad (9)$$

式(6)~(9)中:  $u$  为  $z$  高度处的风速;  $u_0$  为参考高度处的风速;  $u_{avg}$  为平均流速;  $z$  为距地面的高度;  $z_0$  为参考高度;  $z_g$  为梯度风高度;  $\alpha$  为地面粗糙度指数, 本文取  $\alpha=0.16$ ;  $k$  和  $\epsilon$  分别为湍流动能和湍流耗散率;  $I$  为湍流强度;  $l$  为湍流长度尺度;  $C_\mu$  为常数, 本算例取值 0.085;  $K=0.42$ , 是卡曼常数.

(2) 出口边界条件: 定义出口为 outflow 自由出流边界, 假定出流面上的流动已充分发展, 出口方向上所有流动变量的扩散流量为零, 不存在回流<sup>[18]</sup>.

(3) 固体壁面边界条件: 由于建筑物表面和地面是相对固定的, 故在模型表面和计算区域边界的底面采用无滑移的壁面条件(wall). 假定风场的上表面和侧面的空气流动不受建筑物的影响, 设为自由滑移表面.

## 3 培训中心建筑环境舒适性分析

案例中的培训中心建筑群布局为半围合式, 建筑群中心形成开阔的广场为人们休闲活动提供了便利. 该布局方式的通透性好, 可以兼顾大部分建筑的朝向, 有利于采光通风, 在群体内部和背风区以及转角处可能会出现气流停滞区, 严寒季节里可阻止冷风的侵袭.

### 3.1 行人高度风速分析

将礼堂、宿舍、食堂等建筑模型等大小导入 Fluent 软件中, 环境风的方向分别为(夏季)正南方向和(冬季)东北方向, 风速通过式(5)计算得出. 经过迭代计算, 得出不同高度的风速矢量分布图.

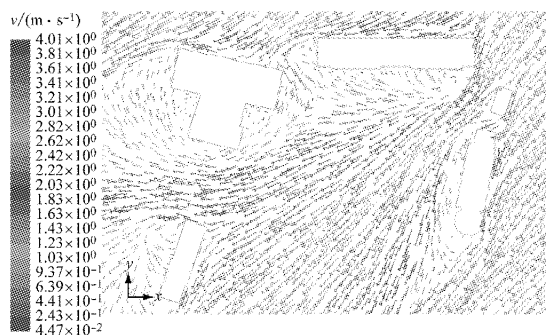
图 4 是冬夏两季行人高度(1.7 m)的风速矢量图. 由图 4 可以看出, 夏季行人高度风速主要分布在 0.01~3.50 m·s<sup>-1</sup> 之间, 局部区域可能会达到

$4.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 冬季风速大多分布在  $0.03 \sim 4.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间, 最大风速不超过  $4.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 根据加拿大安邸(RWDI)风工程公司户外风速舒适度标准, 低于  $4.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风力均不会对行人活动产生障碍, 因而建筑群周围的风环境总体上符合人体舒适性的要求。

建筑群的西南侧是游泳池和运动场. 夏季, 在偏南风的作用下, 有微风吹过; 而冬季, 由于西侧建筑群的多层遮挡, 该区域风速较小, 活动的人群几乎感觉不到环境风的存在, 有利于学员室外运动. 运动场与礼堂之间是成排的冠状植物, 可起到隔离降噪的作用<sup>[19]</sup>. 同样的, 夏季, 由于建筑群南部为空旷的地面和低矮的植被, 中心广场的环境风不会受到建筑物的遮挡, 主要为  $2.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右的轻风, 较为舒适; 而在寒冷的冬季, 东北两面建筑物能够阻挡风沙, 减少中心广场处冰雪堆积, 防寒保暖, 减弱低温天气给室外活动的人群带来的不适感. 不过, 在东北风作用下, 冬季, 处于上风向的宿舍和配套建筑之间会形成小规模峡谷风, 在大风天气需要防范注意。



a 夏季风速



b 冬季风速

图4 夏季和冬季行人高度(1.7 m)风速矢量分布图

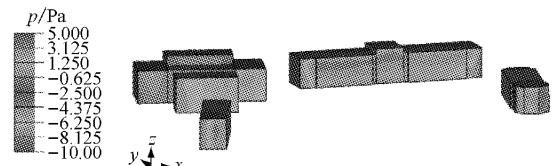
Fig. 4 Vector diagrams of wind velocity at pedestrian level (1.7 m height) in summer and winter

### 3.2 建筑群自然通风性能分析

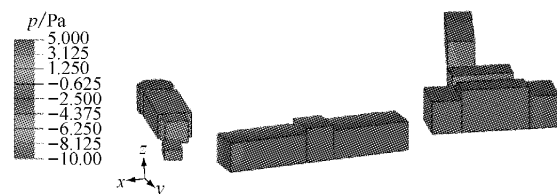
建筑体内外部的通风条件对人体健康、舒适性有着重要的影响. 人们在不同的通风状况下, 其热舒

适范围是不一样的: 通风良好的状态下, 温度不高于  $28^\circ\text{C}$ , 相对湿度不大于  $80\%$  时, 人体感觉舒适; 而在通风不畅时, 温度高于  $26^\circ\text{C}$  就会感到闷热. 自然通风作为一项廉价的技术手段, 可以起到提供新鲜空气和释放建筑结构中积蓄的热量等作用<sup>[20]</sup>.

建筑物外表面的风压是自然通风的基本动力之一. 图5和图6分别是模拟夏季和冬季建筑群迎风面和背风面承受的风压云图. 从图5, 6可以看出, 建筑群的迎风面主要为正压区, 侧面也会有正压区出现, 而建筑的背风面基本上都处于负压区. 垂直方向上, 由建筑底部开始至  $1/4$  高度处, 迎背风面的壁面压差随着高度的增加逐渐减小; 由建筑高度的  $1/4$  处向上, 迎背风面的压差慢慢增大, 在建筑高度的  $3/4$  附近出现了最大值; 随后, 压差随着高度的增加显著减小, 在建筑物顶部降为最低, 这一实验结果与文



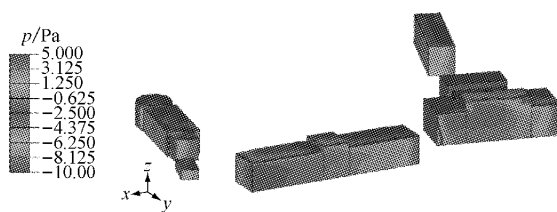
a 迎风面风压



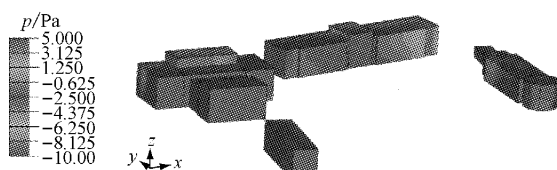
b 背风面风压

图5 夏季建筑群迎风面和背风面承受的风压

Fig. 5 Pressure distribution on building surfaces in summer



a 迎风面风压



b 背风面风压

图6 冬季建筑群迎风面和背风面承受的风压

Fig. 6 Pressure distribution on building surfaces in winter

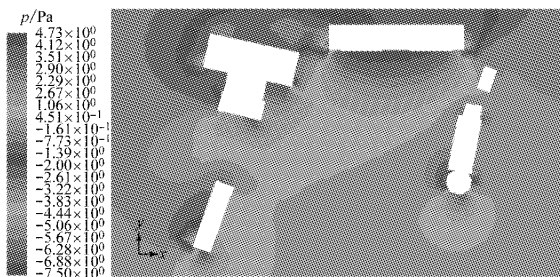
献[21-22]基本吻合。水平方向上,建筑迎风面的风压由中部向两侧逐渐减小,背风面的风压变化不大,由此产生的通风效果也是中间优于两侧。在夏季偏南风的作用下,宿舍楼(图7)第3层中间部分的自然通风效果最好;在冬季东北风的作用下,宿舍大部分区域通风流畅,只有西部小部分区域的迎背风面压差偏小,空气流通较弱。全年中,礼堂的东半部分通风状况都要好于西部,由于该建筑前后宽度较大,西半部分可能需要强制送风或排风手段改善室内环境品质。



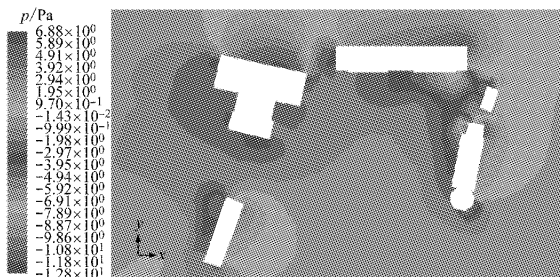
图7 培训中心宿舍楼立面图

Fig.7 Dormitory elevations of training center

图8分别是夏季和冬季5 m高度建筑群周边的压力云图,其模拟结果与图5,6一致,半围合式布局将空间分割成了内外两部分,在一定程度上形成了组团内外的风压差,能够促进自然通风<sup>[23]</sup>。夏季,北侧的宿舍楼几乎垂直于主导风向,产生的穿堂风有利于室内通风散热和污染物的扩散;而冬季该建筑与主导风向呈45°角,在保证气流通畅的情况下降低



a 夏季压力云图



b 冬季压力云图

图8 夏季和冬季5 m高度压力云图

Fig.8 Pressure maps around buildings at 5 m height above ground in summer and winter

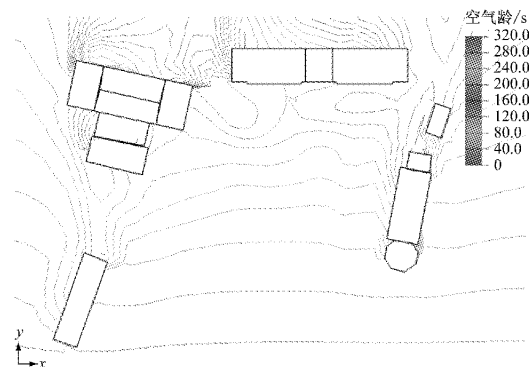
了室内的热量耗散,起到了建筑保温的作用。总体上,建筑物与主导风向多呈30°左右的夹角,为室内空气流通提供了保证。

### 3.3 建筑群空气品质分析

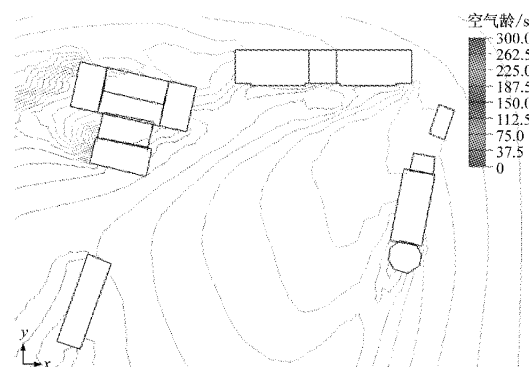
室内污染物的浓度一般是室外污染物的2~5倍,而人类至少70%以上的时间在室内度过,长期生活和工作在建筑内的人们表现出越来越严重的病态反应,被称为病态建筑综合症(sick building syndrome, SBS)<sup>[24-25]</sup>。现代家居中,建筑材料、装饰材料、厨房燃烧产物、香烟雾、生活垃圾等都可能产生化学污染,对人体健康和生活质量造成不良影响。

室内空气品质的优劣很大程度上取决于室外新风量,当室外空气温度、湿度较低时,自然通风可以在不消耗能源的情况下降低室内温度,带走潮湿气体,稀释室内污染物浓度,达到人体热舒适和提升环境质量。案例中半围合式布局的开口方向设计在建筑群的南部,与夏季主导风向一致,外界新鲜空气大量流入围合区域内,有效避免了可能出现的建筑中庭气流停滞问题。

图9是夏冬两季在建筑群5 m高度的空气龄等值线图。由图9可见,案例中大部分区域的空气龄都



a 夏季空气龄等值线



b 冬季空气龄等值线

图9 夏季和冬季5 m高度空气龄等值线图

Fig.9 Air age contour maps at 5 m height above ground in summer and winter

在 4 min 以下,空气流通顺畅;只有左上角部分区域因建筑物的遮挡导致空气龄在 7 min 左右,略微偏大.整体而言,建筑外部的空气较为新鲜,有助于室内空气的更换和环境的改善.

## 4 结论

建筑物的存在会使其附近的气流运动、气压分布及热环境发生一定程度的改变.结合当地气候环境,因地制宜,合理规划建筑布局,对于建筑节能环保和居民生活的舒适健康有着重要的意义.本文以河南省公安厅警官培训中心为例,使用 CFD 软件对其建筑环境进行模拟,从建筑群附近行人的舒适性、建筑自然通风状况和空气品质三个方面对规划方案进行分析,并得出以下结论:

(1) 半围合式布局较好地利用了当地季风风向,总体上提高了人们室外活动的舒适度.冬季,上风向的两建筑相接处容易产生峡谷风,在大风天气会对行人造成不适感.

(2) 建筑迎背风面形成的压差有利于室内自然通风,其中,在正对着主导风向的建筑物 3/4 高度处通风效果最佳.

(3) 半围合式结构将建筑空间划分为内外两部分,冬季有利于防风保暖,同时,也避免了围合式结构出现的夏季中庭散热不畅现象.

(4) 建筑外部空气龄整体较小,空气新鲜,为室内空气品质的提升提供了保证.

## 参考文献:

- [1] 熊志坚,张雷,丛滋庆,等.绿色建筑设计中场地选择与设计的计算机实现[C]//工程设计与计算机技术:第十五届全国工程设计计算机应用学术会议论文集.哈尔滨:中国土木工程学会,2010:56-58.  
XIONG Zhijian, ZHANG Lei, CONG Ziqing, *et al.* A computer-implemented site selection and design of green building [C]//Engineering and Computer Technology: Fifteenth National Computer Applications on Engineering Design Conference Proceedings. Harbin: China Civil Engineering Society, 2010:56-58.
- [2] 仇保兴.从绿色建筑到低碳生态城[J].城市发展研究,2009,7:1.  
QIU Baoxing. From green building to low carbon ecocity[J]. Urban Studies, 2009, 7: 1.
- [3] 刘少锋,任杰.某建筑群室外风环境的 CFD 模拟与评价[J].山西建筑,2013,39(4):110.  
LIU Shaofeng, REN Jie. CFD simulation and evaluation of a buildings group outdoor wind environment [J]. Shanxi

- Architecture, 2013, 39(4): 110.
- [4] Clark H. Building education: the role of the physical environment in enhancing teaching and research[M]. London: Institute of Education, 2002.
- [5] Yoshie R, Mochida A, Tominaga Y, *et al.* Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the architectural institute of Japan [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(9): 1551.
- [6] Kim S E, Boysan F. Application of CFD to environmental flows [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81(1): 145.
- [7] Chang D. Aerodynamic performance driven form-generation for skyscraper design[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2013.
- [8] 杨丽.同济大学文远楼周边风环境研究[J].华中建筑,2010(5):29.  
YANG Li. Study on wind environment around Wenyuan Building in Tongji University [J]. Huazhong Architecture, 2010(5): 29.
- [9] 马剑,舒欣,杨友东.群体建筑风环境的仿真研究[J].计算机仿真,2008(6):296.  
MA Jian, SHU Xin, YANG Youdong. Numerical simulation of wind environment around buildings[J]. Computer Simulation, 2008(6):296.
- [10] 王福军.计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.  
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis—theory and application of CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [11] 史彦丽.建筑室内外风环境的数值方法研究[D].长沙:湖南大学,2008.  
SHI Yanli. Numerical research on building indoor and outdoor wind environment[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [12] Smith L M, Woodruff S L. Renormalization-group analysis of turbulence[J]. Annual review of fluid mechanics, 1998, 30(1): 275.
- [13] Li Xianting, Li Dongning, Yang Xudong, *et al.* Total air age: an extension of the air age concept [J]. Building and Environment, 2003, 38(3): 1263.
- [14] 杨易,金新阳,杨立国.薄膜结构风荷载数值模拟的新方法和应用[C]//第十四届全国结构风工程学术会议论文集.北京:中国土木工程学会,2009:896-901.  
YANG Yi, JIN Xinyang, YANG Ligu. New methods and applications of numerical simulation on thin film structure wind load [C]//Eleventh National Wind Engineering Conference Proceedings. Beijing: China Civil Engineering Society, 2009: 896-901.
- [15] 周大伟,黄本才,郑本辉,等.金茂大厦平均风压及周围风环境干扰数值风洞模拟[C]//第十一届全国结构风工程学术会议论文集.三亚:中国土木工程学会,2004:453-459.  
ZHOU Dawei, HUANG Bencai, ZHENG Benhui, *et al.* Numerical wind tunnel simulation of average air pressure and wind environment around Jin Mao Tower [C]//Eleventh National Wind Engineering Conference Proceedings. Sanya: China Civil Engineering Society, 2004:453-459.

(下转第 887 页)